

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ПРОГНОЗ И ЭКСПЕРТИЗА УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ЖРД НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

**Показано, что ВЧ-неустойчивость в ЖРД может возникнуть только в условиях турбулентного потока, а точнее в ядре камеры горения. Наиболее вероятная область – область вблизи форсуночной головки.**

**Основными принципами подавления неустойчивости являются: ламинаризация потока; ликвидация положительных градиентов давления; увеличение вязкости (переход на другие компоненты).**

**На базе этих принципов могут разрабатываться конструкторские мероприятия (кресты, выдвижные форсунки, резонаторы...). Показано, что способ возбуждения колебаний (мягкий или жесткий) в ЖРД не может приводить к ВЧ-неустойчивости.**

**It is shown that high-frequency instability in the LRE can occur only in turbulent flow conditions, or rather in the core of the combustion chamber. The most likely area is the area near the nozzle head. The main principles of instability suppression are: flow lamination; elimination of positive pressure gradients; increased viscosity (the other components). On the basis of these principles can be developed design activities (crosses, retractable nozzles, resonators...). It is shown that the method of excitation of oscillations (soft or hard) in the LRE can not lead to HF instability.**

**Ключевые слова:** турбулентность, устойчивость, камера, двигатель.

**Keywords:** turbulence, stability, camera, engine.

Пожалуй, самая актуальная и трудная проблема, которая возникает при создании ЖРД, это проблема ВЧ-устойчивости. В настоящее время отсутствуют адекватные методы прогноза этого уникального явления, а методы борьбы с ним начинаются после того, как начал "частить" неправильно спроектированный и уже изготовленный из "железа" двигатель. Существующие методы расчета прогнозных параметров ВЧ-устойчивости имеют существенную ущербность как в постановке, так и в их реализации. Отсутствие в этих методах вязкости и сжимаемости не только не дают возможности правильных предсказаний, но они и не предусмотрены для правильной постановки задачи. Другими словами, на сегодняшний день не существует таких критериев, по которым можно судить о возникновении ВЧ-неустойчивости.

Более того, многие понятия этой темы так и не объяснены: что это такое и как это влияет на процесс?

1. Такое понятие как автоколебания [1], берущее свое начало из теоретических работ Планкаре, экспериментальных Ван дер Поля и сформулированных Андроновым и Виттом, путают с понятием резонанса. Первое - это равенство диссилиативных и дисперсных сил, а второе - это равенство частот собственных и вынужденных.

2. Неправильно используются понятия "мягкое" и "жесткое" возбуждение. Считается, что в зависимости от типа возбуждения можно прийти или не прийти к возникновению неустойчивости. Это принципиально не так. Устойчивой системе, а именно колебательному контуру в виде продуктов сгорания внутри камеры, все равно как на неё будет воздействовать внешнее усилие. Она (устойчивая система) действительно может начать колебаться, но эти колебания затухнут, и система не достигнет автоколебательных движений. А вот если система неустойчива, то достаточно даже малых воздействий, чтобы привести ее в состояние автоколебаний. Тогда и нет различий, как она будет приведена в состояние неустойчивости, "мягко", с малыми градиентами, или "жестко" - с большими.

3. Существующий критерий Релея, который был им получен после анализа опытов Рийке и Босча-Рисса, достаточно сплювчатый и в практических расчетах не удобен, хотя хорошо отражает основные физические процессы. Этот критерий практически не используется в методиках.

Таким образом, можно констатировать, что, к сожалению, в настоящее время российская наука (да и мировая тоже) в этой об-

ласти знаний (ВЧ-устойчивости) находится на начальном этапе своего развития. Прямым текстом это означает, что в настоящее время нет достоверных методов анализа, позволяющих прогнозировать данное явление на стадии проектирования и нет методов для проведения качественной экспертизы для, хотя бы, оценки выявления причин уже возникшей неустойчивости и разработки рекомендаций по ее устранению. Нет!

### Существующие методы борьбы с неустойчивостью

Наиболее "ходовые" методы, которые применяются на сегодняшний день - эмпирические [2]. Ранее было показано, что если в области форсуночной головки установить крест Исаева, то можно избежать неустойчивости. Можно, но не всегда. Так называемый крест Исаева - это пластины вдоль потока, которые разбивают вихри и тем самым можно подобрать их количество 5 или 6 и т.д., когда двигатель не будет "частить". Для этого все-таки нужно сделать двигатель и его испытать на ВЧ. Если не частит, то это очень хорошо. Повезло. Но, как правило, он (двигатель) начинает частить. Тогда в лабораторных условиях его начинают доводить. И если это не получается, то двигатель надо выбрасывать. Как же понять, как устанавливать эти спасительные пластины? А никак. По наитию. Методом проб и ошибок. С учетом предыдущего опыта.

Есть еще один способ. Этот крест сформировать из форсунок. Другими словами, часть форсунок выдвинуть вперед к соплу, рассекая плоскость форсунок неким подобием креста. Этот способ, как показала практика, очень продуктивен. Помимо того, что сам поток в камере несколько ламинаризируется, сдвигается область перемешивания компонентов (окислителя и горючего), а значит сдвигается область подвода в систему внешней энергии, необходимой для автоколебаний.

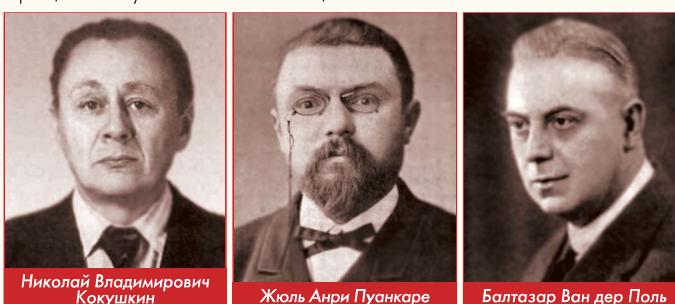
Пожалуй, наиболее вразумительным является метод борьбы с неустойчивостью, который был разработан на базе великолепных результатов опытов Рийке. Это - красивый метод, но он чисто эмпирический. Для того, чтобы им воспользоваться, необходимо знание того факта, что двигатель частит и все, больше ничего! Тогда, памятую об опытах Рийке, можно сказать, что если труба (у нас камера) "запела", то в области максимального подвода энергии сосредоточилась пучность волн и остается только отодвинуть место подвода энергии в сторону сопла. Другими словами, если переместить зону пересечения струй от форсунок дальше к срезу, то место подвода не будет совпадать с пучностью и автоколеба-

ний (неустойчивости) не возникнет. Таким способом часто пользовались при отработке камер сгорания и часто (конечно, не всегда) этот способ приводил к положительным результатам.

Отметим, что все способы, в том числе и описанный выше, основаны на изменении геометрии камеры сгорания. Но вот как ее изменять! Существующие методы на эту тему в настоящее время далеки от совершенства. В отдельных книгах можно найти рекомендации по выбору длины камеры ЖРД, по соотношению ее длины и диаметра, но этого мало. Ведь рекомендации даны по трубе, а камера сгорания - далеко не труба.

### Метод прогноза ВЧ

В работе [3] изложен новый метод, который позволяет еще на стадии проектирования ЖРД определить потенциальные области возникновения ВЧ-неустойчивости [3]. Следует сразу заявить, что в РДТТ неустойчивости быть не может. Возникающие эпизодически колебания по разным причинам (колебание первьев заряда, встречные потоки и др.) со временем исчезнут из-за быстро изменяющегося свободного объема. Исследования Н.В. Кокушкина и его коллег показали сильное влияние частиц к-фазы на процесс затухания возникающих колебаний.



Николай Владимирович Кокушкин

Жюль Анри Пуанкаре

Балзас Ван дер Пол

Разработанный метод позволяет определить эти (эпизодические) колебания, но автоколебания - нет, так как их не будет. Для проведения расчетов по методике камеры ЖРД необходимо прежде всего начертить и рассчитать. Расчет проводится до ее изготовления с учетом рекомендаций работы [4]. При этом следует выполнить необходимые и достаточные условия возникновения автоколебаний:

$$\frac{\kappa M^2}{\nu} \cdot \frac{d\left(\frac{\vec{v}}{\text{rot}^2 \vec{v}}\right)}{d\tau} > \frac{1}{4} \quad \text{и } \omega = \text{const.}$$

Далее нужно правильно рассчитать газовое поле  $\vec{v}(x, y, z, t)$ . К большому сожалению, следует сказать, что современные электронные продукты для расчета газового поля, построенные на уравнениях Рейнольдса, не позволяют выделить области образования вихрей. Они рассчитаны только на определение течений по руслу, то есть ламинарных течений (первая тройка уравнений) и на расчет так называемых пульсационных течений поперек потока (другая тройка уравнений), которые, по сути, тоже имеют поступательное движение, но в разных направлениях.

Прямой расчет уравнений Навье-Стокса возможен только для очень маленьких, практически микроскопических объемов в силу высоких требований, накладываемых на ЭВМ. Поэтому получить поле роторов можно только после разработки соответствующих новых программ. Эти программы должны основываться на преобразованных уравнениях Навье-Стокса, строго соответствующих правилам преобразования. Такие преобразования изложены в [5] и на их базе стало возможным правильно поставить газодинамическую задачу. Основное уравнение имеет вид:

$$\text{rot} \vec{j} = \pm \sqrt{\frac{(1 - M^2)}{\nu}} \cdot \vec{j} \cdot \text{grad} p.$$

Или, если перейти к скоростям, то

$$\text{rot} \vec{v} = \pm \sqrt{M^2(1 - M^2)} \frac{1}{\mu} \vec{v} \text{grad} p.$$

Границные условия на стенке и на оси записутся:

$$\vec{v}_w = 0,$$

$$\frac{d\vec{v}_{\text{осн}}}{dy} = 0.$$

Видно, что основное уравнение, которое учитывает вязкость и сжимаемость потока, дополняется условиями прилипания и сопровождения [6]. Последняя система, а именно:

$$\frac{\kappa R^3}{\nu a^2} \cdot \omega \cdot \frac{d\vec{v}}{d\tau} > 1,$$

и

$$\text{rot}^2 \vec{v} = M^2(1 - M^2) \frac{1}{\mu} \cdot \vec{v} \cdot \text{grad} p \quad (\mu = \nu \cdot \rho),$$

где  $R$ ,  $\omega$  и  $a$  - радиус вихря, его угловая скорость и скорость звука; позволяет определить области, где возможно возникновение ВЧ-неустойчивости (рис. 1).

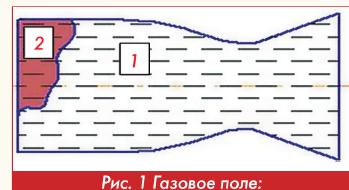


Рис. 1 Газовое поле:  
1 - устойчиво, 2 - неустойчиво

### Физические принципы борьбы с неустойчивостью

Опираясь на полученную выше систему можно предложить несколько мероприятий по устранению ситуаций, когда в процессе работы ЖРД возникает ВЧ-неустойчивость.

Прежде всего следует сказать, что ВЧ-неустойчивость возникает исключительно в турбулентных потоках, а именно, в случае, когда сформируются такие устойчивые пространственные циклические движения в виде устойчивых вихрей, которые при соответствующих ограничениях перейдут во временную циклику:

$$\omega \rightarrow \omega_0,$$

где  $\omega$  - угловая скорость вихря,  $\omega_0$  - собственная частота колебаний внутри системы.

Где же может возникать турбулентность? Ответ: только в камере [7]. Но при правильно спрофилированном двигателе  $\text{grad} p$  всегда отрицательный, и в камере, и в сопле:

$$\text{grad} p < 0, \\ \text{grad} \vec{v} > 0.$$

Тем не менее, в области форсуночной головки, начиная от ее стенки, до конца зоны горения, поток будет турбулентным [8]. За пределами зоны горения (рис. 2) поток опять станет ламинарным. На протяжении всего последующего движения он таким и останется. Конечно, если не возникнет особых предпосылок, когда  $\text{grad} p$  станет больше нуля.

Итак, прежде всего, с неустойчивостью нужно бороться, деформируя геометрию камеры непосредственно в области форсунок. Но это самое очевидное.

Как было показано, так и делают, но методом проб и ошибок.

Какие еще способы устранения можно отметить? Сформулируем рекомендации:

1. Надо уходить от турбулентности, хотя это и противоречит основному требованию по смесеобразованию для обеспечения полноты выгорания топлива. Тем не менее, нужно стремиться уменьшать ротор:  $\text{rot} \vec{v} \rightarrow 0$ .

2. Надо замедлять поток, что опять же приводит к его ламинаризации.

3. По возможности переходить на вязкие компоненты ( $\mu \uparrow$ ).

4. Необходимо снижать положительный градиент давления ( $\text{grad} p \rightarrow 0$ ).

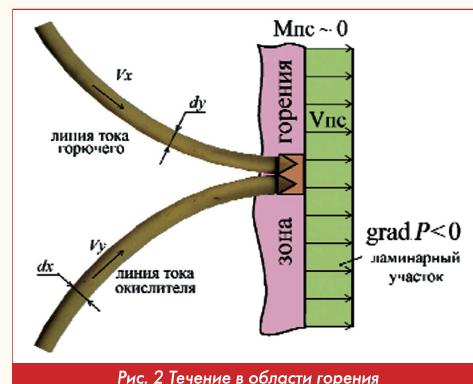


Рис. 2 Течение в области горения

5. Необходимо снижать число Рейнольдса.
6. Необходимо снижать показатель адиабаты.
7. Повышать скорость звука в потоке или, что тоже самое, повышать газовую постоянную и температуру потока.
8. Можно для демпфирования колебаний добавлять в поток мелкие частицы.
9. Стремиться создавать турбулентность с малоразмерными вихрями, то есть мелкомасштабную турбулентность ( $R \rightarrow 0$ ).
10. По возможности ликвидировать парность вихрей, например, устанавливать на головке нечетное количество форсунок.
11. И еще один очень тонкий момент. Для его иллюстрации преобразуем второе уравнение и представим его в виде:

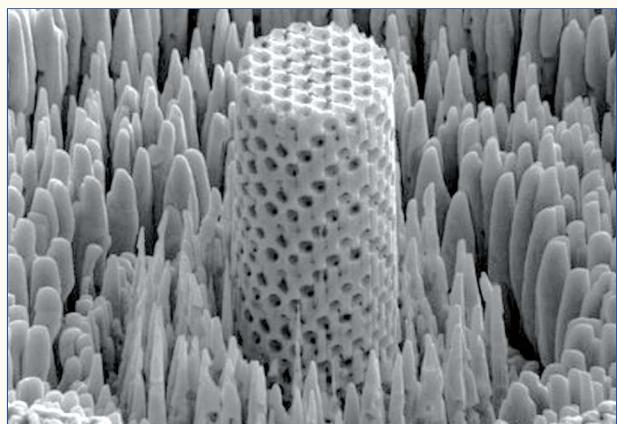
$$\text{rot}^2 \vec{v} = M^2(1 - M^2) \frac{1}{\mu} \frac{dp}{d\tau}.$$

Получается, что положительный рост давления, его величина, влияет на возникновение турбулентности. Чем больше  $dp/d\tau$ , тем интенсивнее турбулентность. То есть чем больше производная  $dp/d\tau$  или чем круче зависимость  $p(\tau)$ , тем жестче воздействие на колебательную систему. Другими словами, можно констатировать, что на режиме выхода двигателя на расчетную величину давления система может быть подвергнута жесткому возбуждению. В этом случае могут возникнуть колебания с амплитудой тем большей, чем производная больше. Но эти колебания, скорее всего, затухнут, если не будет выполнено достаточное условие постоянства ротора. Именно постоянство ротора приводит к автоколебаниям. А это произойдет только в случае, если  $dp/d\tau = \text{const}$  (число Маха в цилиндрической камере практически не меняется). Но производная  $dp/d\tau$  не может быть постоянной величиной, так как известно, что кривая выхода двигателя на режим имеет сильную зависимость от времени [9].

## ИНФОРМАЦИЯ. "Металлическое дерево"

Группе ученых из американских университетов (Пенсильванского, Иллинойского и Кембриджского) удалось контролировать процесс создания структурированного материала на уровне отдельных атомов. В результате был получен новый материал, получивший название "металлическое дерево". Этот материал был изготовлен из никеля, но его вес в пять раз меньше исходного материала, а по прочности он превосходит титан.

Прочность нового материала основывается на том же, что и у чистой целлюлозы, являющейся мягким материалом: высокая прочность получается при ее формировании в виде структуры древесины. В настоящее время в некоторых видах искусственных целлюлозных материалов удалось практически достичь показателей прочности некоторых марок стали.



Новый материал получился во время поиска и отработки новых методов создания металлической пористой структуры, напоминающей структуру древесины. Для достижения подобного эффекта использовалась процедура вспенивания расплавленного металла или трехмерная печать, обеспечивающая точность в несколько сотен нанометров. Однако, у обоих методов имеются свои недостатки: при вспенивании очень трудно добиться равномерного распределения плотности материала, а процесс трехмерной печати крайне медленен для его использования в промышленном производстве.

Согласно результатам предыдущих исследований, ключевую роль в увеличении прочности материала играет уменьшение размера его структурных единиц. Исследователям удалось этого добиться при помощи пластиковых наночастиц, размерами в несколько десятков нанометров, равномерно размещанных в воде. При испарении воды эти сферические частицы упорядочиваются в виде геометрически правильной структуры, после чего на их поверхность гальванически осаждается слой никеля, который постепенно заполняет все пространство между частицами. После этого пластик удаляется путем растворения и оста-

тся тончайшая металлическая сетка. Коэффициент заполнения пространства металлом не превышает 30 %, остальные 70 % приходятся на пустоту. Удельный вес этого материала получился менее 1.

До последнего времени ученым удавалось создать образцы "металлического дерева" в форме фольги, площадью около одного квадратного сантиметра. Дальнейшие исследования направлены на изучение свойства "металлического дерева" и его поведения под воздействием экстремальных механических нагрузок.



Другой интересный потенциал данной технологии заключается в том, что пустое пространство в металлической структуре может быть заполнено другим материалом. Естественно, что металлическая структура, заполненная жидким или твердым электролитом, может стать элементом аккумуляторной батареи очень большой емкости, которая сможет питать очень долгое время устройство, в которое она встроена.

## Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и автоколебательный процесс в ЖРД // Двигатель №3, 2012.
2. Е.В. Лебединский, И.Г. Лозино-Лозинская, И.В. Меркулов и др. Акустические средства борьбы с неустойчивостью горения // М. "Центр Келдыша", 2005.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Возникновение неустойчивости в ЖРД // Двигатель №2, 2012.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и неустойчивость в ЖРД // Двигатель №6, 2011.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и математическое доказательство ее невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель №3, 2018.
6. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Фундаментальное гравитационное условие сопровождения и новая постановка краевой задачи вязкой газовой динамики // Двигатель №5, 2015.
7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность при работе тепловых турбомашин // Двигатель №2, 2018.
8. Ю.М. Кочетков. Критические параметры процессов в энергодвигательных установках // Двигатель №6, 2018.
9. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Закон пси от кси // Двигатель №2, 2017.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com